

材料デザイン学 第3回

機械的特性 / 靱性

岸田 逸平

Last-modified: 2016/10/12 22:25:05.

目次

1	概要	2
2	破壊のメカニズム	2
2.1	紙を破ってみる	3
2.2	亀裂のタネはどこにある?	3
3	靱性の改善	4
3.1	粒界強化	5
3.1.1	研究紹介	5
3.2	強化ガラス	5
3.3	ZrO ₂ における破壊靱性の改善の事例	6
3.3.1	ZrO ₂	6
3.3.2	改善のための基本方針	6
3.3.3	部分安定化ジルコニア	6
3.4	複合材料	7
4	亀裂進展の積極的利用	7
5	まとめ	8
5.1	小レポート	8

1 概要

強度と靱性は背反することが多い。もし君の解決すべき課題が靱性のみならば、話は簡単だ。より軟らかい材料を使えば良い。極端な話、ゴムでも使えば靱性が問題になることはほとんどない筈だ。問題は靱性が必要とされる材料は多くの場合同時に一定以上の強度が必要とされることである。たとえば、ゴムでは強度が低すぎて高層建築には使えない。

靱性

- _____ : 外力に追従して変形するものの除荷すると形状が元に戻る性質。
- _____ : 外力に追従して変形し除荷しても形状が元に戻らない性質。
- _____ : 材料が耐えうる応力の強さ。
- _____ : 材料の粘りの強さ。破壊に要するエネルギー。

変形の模式図を Fig. 1 に示す。

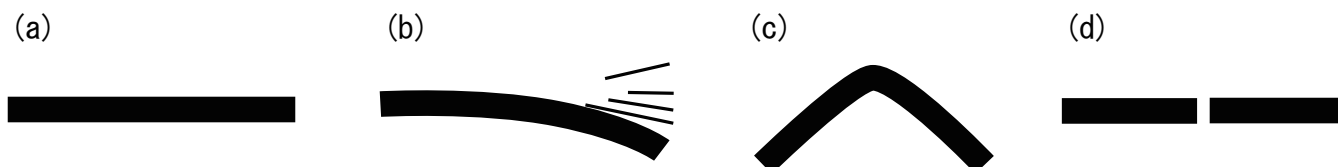


図 1 (fig20131024a) 機械的特性の関係する挙動の模式図。(a) 初期状態。(b) 弾性変形、弾性。(c) 塑性変形、塑性。(d) 破壊。

応力-歪み線図で表すと Fig. 2 のようになる。

靱性を制御するには、破壊についてよく知らなければならない。

2 破壊のメカニズム

材料の破壊とは、材料内部を _____ が _____ し、貫通すること。(Fig. 3) 構造材料には大小さまざまな応力がかかるが、応力に耐えられない部分では組織が解離する。材料に亀裂など鋭い形状の _____ があると、応力負荷時に _____ が生じ、その組織が耐えられなくなり解離する。このことによ

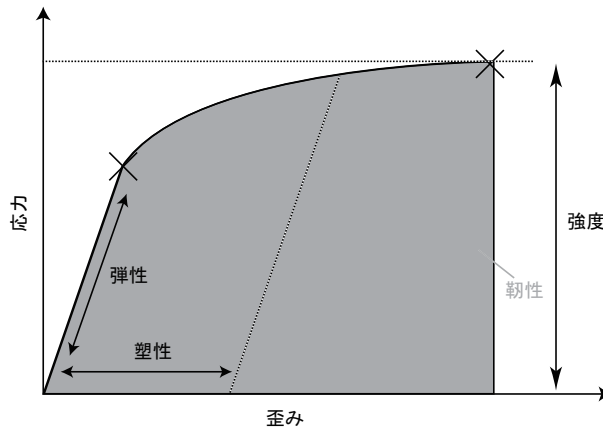


図 2 (fig20141030a) 応力-歪み線図。

り亀裂の先端は移動し、移動した先でまた同様の現象を生じて亀裂が進展する。

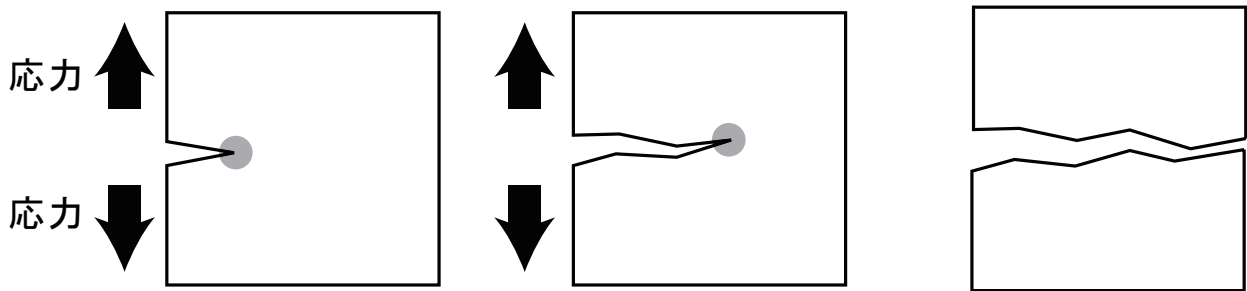


図 3 (fig20131024b) 亀裂進展と破壊のメカニズムの模式図。応力集中部を灰色で示してある。

2.1 紙を破ってみる

手元にいない紙があれば、これを破って亀裂進展を観察してみよう。(Fig. 4)

2.2 亀裂のタネはどこにある？

亀裂進展は元々ある亀裂が進んで破壊箇所が拡大していく現象であり、亀裂がゼロから生じる現象ではない。では、最初の亀裂はどこにあるのだろうか？

紙を破る場面でも Fig. 4(b) のような状態ではかなり大きな力をかけなければ破れなかった筈だ。Fig. 4(c) のように力を集中させて紙を破る場面でも、紙繊維の継ぎ目など、肉眼では見えないスケールの弱い箇所に応力が集中して、これまた肉眼では見えない亀裂が拡大

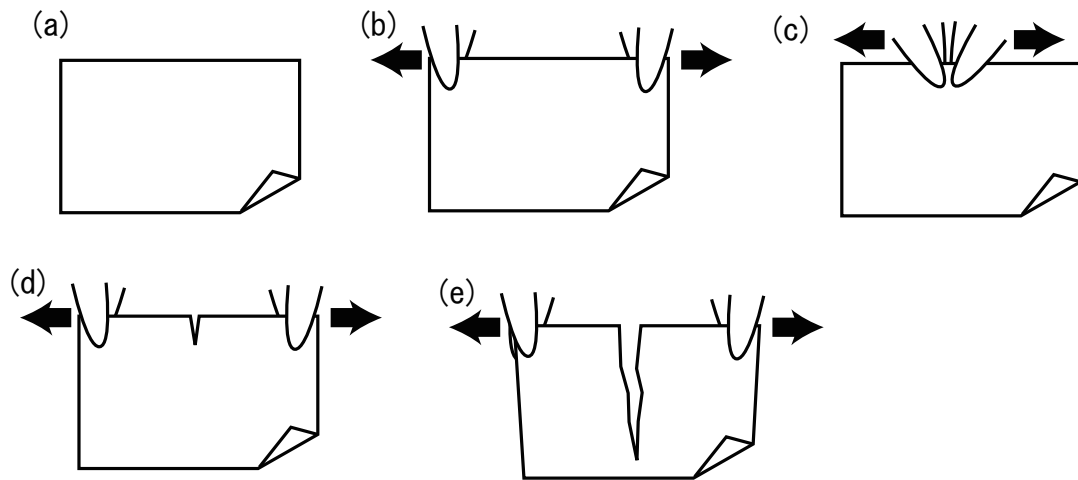


図4 (fig20131024c) 紙をやぶって亀裂進展を確認する。(a) 初期状態。(b) 紙の両端を持って引っぱってもなかなか破れない。(c) 掴む幅を減らして応力集中を起こすと破り易い。剪断方向に応力を働かせるとよりやり易いだろう。(d) 亀裂が生じてしまえば、(b)のように広く持っても勝手に応力集中が働くため容易に亀裂が進展する。(e) こうして材料は破壊される。

している。亀裂の元になる欠陥は現実の材料には多数含まれている。マクロには傷一つないように見えても、ミクロな傷やボイドが多数含まれている。応力が働くとこれらが亀裂の起点や中継点として働くことになる。

理論的には、亀裂が全くない完全結晶を作ることができれば材料の靱性は極めて高くなると考えられる。^{*1}しかし、これは現実には無理な話である。空孔が存在しない結晶を作ることが現実的には不可能であることと同じである。

欠陥のない材料を作ることは諦めよう。結局、靱性の高い材料を作ることは、亀裂が進展しにくい材料を作ることと同義である。

3 靱性の改善

靱性を向上させるには、破壊に要するエネルギー量を増やすということ。さて、どのような方法があるだろうか。

^{*1} 完全結晶だとしても、劈開という現象がある。

3.1 粒界強化

一般に材料の強度と靱性はトレードオフの関係にある。材料の 4 つの強化機構のうち、固溶強化、析出強化、加工硬化は強度を向上させるものの靱性を低下させる。
のみが靱性と強度を同時に向上させる。

何故、粒界強化が効果的なのだろうか？亀裂先端が粒界に達したとき、亀裂は粒界に沿って進もうとする。これによって亀裂は真っ直ぐ進むことができず、余分なエネルギーを消費させられる。(Fig. 5)これが粒界による靱性向上のメカニズムである。では、どのようにして粒界強化を施すことができるだろうか。

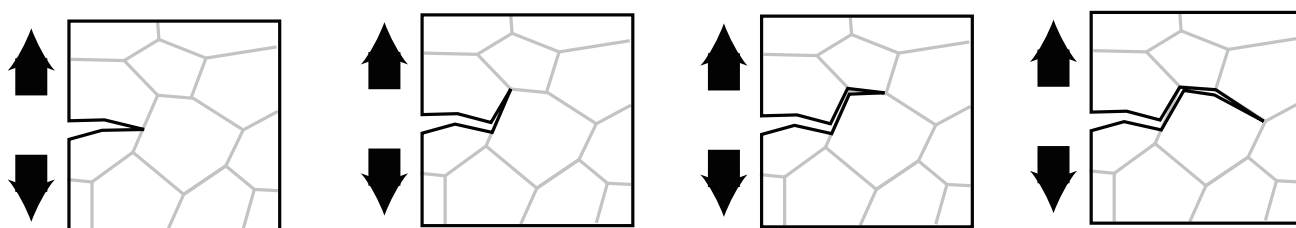


図 5 (fig20131024d) 粒界強化による亀裂進展の抑制。灰色の線で粒界を示している。
Fig. 3 と比較せよ。

3.1.1 研究紹介

3.2 強化ガラス

熱処理や化学処理によって、表面付近に圧縮応力が残留するように作製されたガラス。

強化ガラス工程

安全な暮らしの確立に貢献するために、より強度を求めて製造されるのが強化ガラスです。まず、板ガラスの素板を切断・洗浄し、強化炉に入れます。ここでガラスの軟化温度に近い 650~700 まで加熱成形した後、空気をガラスの両面から全面に吹き付け、一気に急速冷却させます。この加熱・急冷というプロセスによって生じる冷却のタイムラグが、強化ガラスを製造する際のポイントです。まず表面が固まり、遅れて内部が冷えて収縮。そのためガラス表面に安定した圧縮応力層が生まれ、衝撃に対する強度が普通のガラスの 3~5 倍アップします。(日本板硝子株式会社ウェブサイトより)

3.3 ZrO₂ における破壊靱性の改善の事例

セラミックスは一般に靱性が低い。瀬戸物が欠け易いことは普段の生活でも実感したことがあるだろう。しかし靱性を大幅に改善した材料がある。ジルコニア (ZrO₂) だ。これはファインセラミックスとして包丁やハサミなどにも利用されている。

3.3.1 ZrO₂

ダイヤモンドに近い、高い屈折率を持つ。模造ダイヤという異称もある。

酸素イオン伝導体であり、_____ や燃料電池の電解質としての応用。この目的には高温域で動作させるため、昇降温で熱応力が生じる。純粋な ZrO₂ は靱性が低く、この熱応力によってもボロボロと崩れていってしまう。さて今、純粋 ZrO₂ から出発しよう。この靱性を高めるためにどうしたら良いだろうか？

3.3.2 改善のための基本方針

- 焼成前の粉体生成を高精度に制御し、欠陥を抑制。(cf. ファインセラミックスの定義)
- 亀裂の進展に伴うエネルギーについて議論すると、外部から与えられる機械的エネルギーが亀裂表面の生成に伴う _____ に変換されるものと捉えることができる。材料の _____ を大きくすることで亀裂進展は抑制できる。
- 亀裂が複雑に折れ曲がるほど表面積が大きくなり、破断に至るまでに吸収できる機械的エネルギーが大きくなる。
- 亀裂進展に伴うエネルギーを増加させる様々な方法。see 部分安定化ジルコニア。

3.3.3 部分安定化ジルコニア

MgO を数 % 添加することで部分安定化 ZrO₂ となる。

- 純粋 ZrO₂ は温度によって単斜晶・正方晶・立方晶の結晶構造を取る。室温では通常、単斜晶が安定。
- MgO を数 % 添加すると _____ が安定相になる。この結晶が部分安定化ジルコニアと呼ばれる。
- 部分安定化ジルコニアでは、亀裂先端のような強い応力を受けた箇所が

に相変態する。この相変態は高エネルギー状態への
変態のため、機械的エネルギーが吸収され、亀裂の進展が弱められる。

- 相変態に伴い体積膨張を起こし、亀裂先端を押さえ込むような形状変化を伴う。

Fig. 6 に示す。

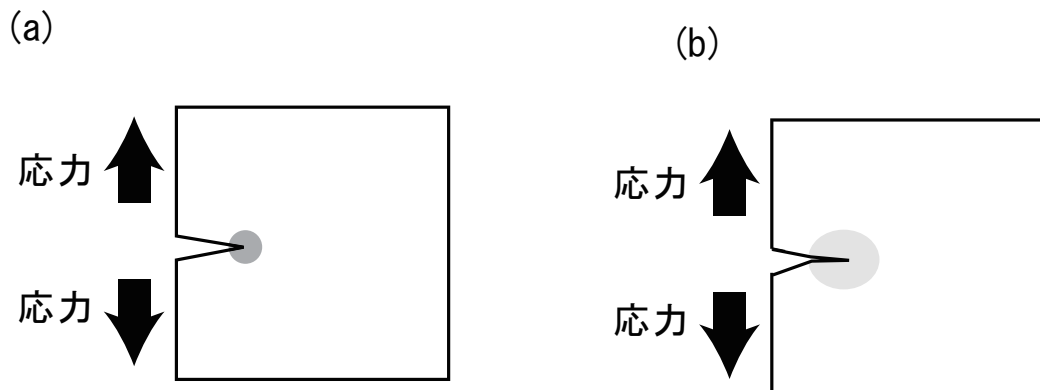


図6 (fig20131024e) 部分安定化ジルコニアによる靱性向上メカニズム。(a) 亀裂先端に
応力集中が生じたところ。(b) 応力に誘起された相変態が生じたところ。

部分安定化ジルコニアの開発により、従来の材料より桁違いに強靱な材料を作り出すことができた。このように従来使われている材料の常識を覆すような新材料を開発することができれば、人類全体にとって大きな資産となる。

3.4 複合材料

複数の材料の長所を組み合わせることで靱性の向上を図ることができる。
や がその代表例である。母材の亀裂の進展をより強靱な繊維で保持している。複合材料の材料デザインについては次回、より詳しく扱う。

(Fig. 7)

4 亀裂進展の積極的利用

食品などの包装材 逆に、破壊（亀裂の進展）を積極的に使う部材もある。食料品の袋など、消費者に届いた後には鋏などの道具を使わずとも便利に取り出せるようにする工夫で

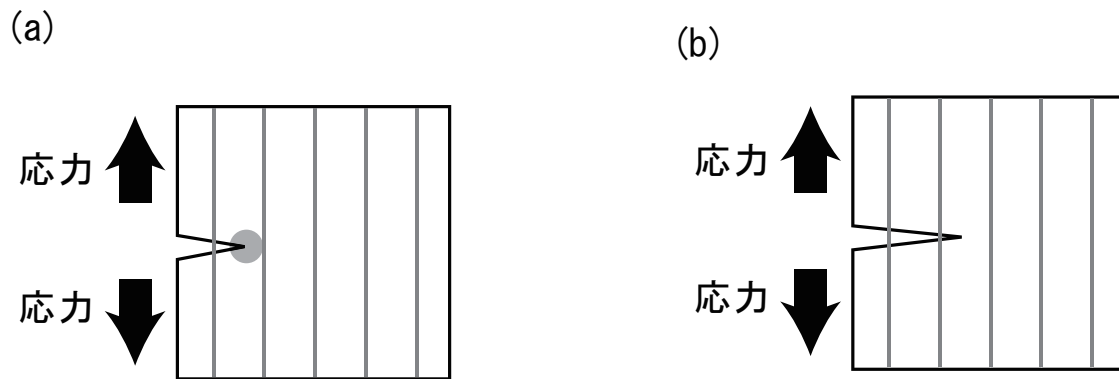


図7 (fig20131024f) 繊維強化複合材料の靱性向上。母材の亀裂進展を、より強度に優れた繊維材料が抑制している。

ある。

快削鋼 強度や靱性を積極的に低下させる応用として、ほかに快削鋼が挙げられる。設計製作実習の授業で鉄鋼よりも真鍮の方が加工性が良いことが実感として得られていることだろう。加工性の悪い鉄鋼材料であっても、それほど強靱性が不要のない部材においては強靱性を犠牲にしても加工性を上げることが優先されることがある。快削鋼は Pb や S などの元素を添加することで被削性を向上させ、切削バイトに加わる抵抗を低減、バイトの長寿命化、仕上面の美しさなどの向上を狙った鉄鋼材料である。

5 まとめ

- 材料の破壊
- 亀裂進展のメカニズム
- 粒界強化
- 部分安定化ジルコニアの相変態
- 複合材料
- 亀裂進展の積極的利用

5.1 小レポート

部分安定化ジルコニアは単斜晶と正方晶の混合体であり、応力によって相変態が生じるものであった。このジルコニアに、さらに MgO 添加量を増やすと結晶全体が完全に正方晶に

なり、少々の応力では単斜晶に相変態しないようになる。完全安定化ジルコニアでは、相変態応力が破壊応力より高くなる。さて、部分安定化ジルコニアと完全安定化ジルコニアではどちらが靱性が高いか？その理由について考察し、論述せよ。